

文章编号: 0253-2239(2003)07-0787-6

利用光折变晶体的电光、压电效应实现 2×2 光开关的原理

董良威 阎晓娜 史开源 颜锦奎

(上海大学理学院物理系信息光学实验室, 上海 200436)

摘要: 讨论了在光折变 LiNbO_3 晶体中建立电场控制的 2×2 直通交换开关的原理设计方案。通过控制读出光栅时外加电场的大小使读出光满足或偏离布拉格条件, 从而控制衍射效率为 1 或 0, 实现开关的交换和直通操作。全面考虑了电场作用下晶体的压电和电光效应, 基于衍射效率公式和光栅的布拉格条件, 给出了为获得最佳衍射效率比时外加电场及写入光束比与记录角度间的关系曲线。

关键词: 非线性光学; 光开关; 理论分析; 光折变晶体; 电光效应; 压电效应

中图分类号: O734⁺.2 文献标识码: A

1 引言

光开关相对于电子开关由于具有宽带、高信噪比、快转换速度以及能够提供无串扰的高密度互连等特性而受到广泛的重视^[1,2], 而其中的光折变全息由于具有高的衍射效率和快的响应速度已成为光开关实现的新的替代方案^[3~5]。最近几年已提出多种光折变开关方案, 如通过控制光折变空间电荷场和光干涉条纹之间的相位差实现了双方向偏转的全光控制开关方案^[6]; 基于光折变晶体的不同特性已有人提出了通过控制读出光束偏振方向实现偏振控制的光折变开关方案和基于光折变晶体各向异性衍射特性的光开关方案^[7,8]。电控光折变开关的基本思想是采用外加电场的方法对 LiNbO_3 晶体的电光效应和压电效应进行利用从而实现电场控制的光折变开关, 而外加电场的大小和方向是很容易控制的, 因此电控开关具有操作容易、性能可靠和受工作环境因素影响小的特点。目前, 国际上已有人利用光折变晶体的电光效应实现了宽角度电光开关直通功能的实验报道^[9], 但该文中并没有给出详细的理论分析; 利用光折变晶体的电光效应实现局域全内反射的电控光折变开关的理论和实验最近已有报道^[10]; 最近一种新的基于电控 2×2 直通交换开关的多级互连解决方案也研究成功^[11]。本文讨论电场控制的光折变开关方案, 通过控制读出光栅时外加电场

的大小使原记录光束读出时满足或偏离光栅的布拉格角条件, 从而控制衍射效率为 1 或 0, 实现开关的交换和直通操作。文章中综合考虑了外电场作用下光折变 LiNbO_3 晶体的电光效应和压电效应, 给出了实现外电场控制的光折变开关的原理设计及有关计算。本文设计方案设计的光折变开关, 与机械光开关相比, 具有转换速度快、成本低、性能可靠的优点, 缺点是由于所需外加电场强度高, 容易造成晶体击穿, 目前作者正考虑如何降低所需要的外加电场强度的大小。

2 电控光开关原理

电场控制的光折变开关基于外加电场对光栅布喇格角的改变。在光折变晶体中, 入射的干涉条纹引起晶体电荷的重新分布, 建立了空间电荷场, 通过电光效应此空间电荷场引起了晶体折射率的变化从而在晶体中记录了光折变光栅。光栅区的折射率可以通过外加电场改变, 此改变的折射率将引起记录光栅的布喇格角的改变, 从而使原记录光束读出时偏离布喇格条件从而使衍射效率降低。通过控制外加电场大小使衍射效率在两种情况下的差异很大就可以实现光开关。

上述的开关原理可以用体光栅的布喇格条件和柯基尼克(Kogelnik)的衍射效率公式^[12]进行讨论。图 1 是记录光栅的矢量图, 其中 R 和 S 分别代表参考光和信号光, K 是记录的光栅矢量方向, 由矢量图确定的光栅布喇格条件是

$$\cos(\phi - \theta) = \frac{\lambda}{2n\Lambda}, \quad (1)$$

其中 ϕ 为光栅矢量和 x 轴之间的夹角; θ 为晶体内的布拉格角; λ 是光束在真空的波长; n 是无外加电场时晶体的平均折射率; Λ 是光栅周期。

考虑在常温 T 和常机械应力 σ 的情况下对晶体外加电场 E , 通过对(1)式左右同时微分, 得到变化的布拉格角 $\Delta\theta$ 和场感应的 $\Delta n(E)$, $\Delta\phi(E)$ 和 $\Delta\Lambda(E)$ 的之间的关系

$$\Delta\theta = \Delta\phi - \cot(\phi - \theta) \left(\frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \right), \quad (2)$$

其中折射率变化 Δn 是由电光效应引起的, 大小与沿 z 轴方向的外加电场 E 的关系表达为^[8~10]

$$\frac{\Delta n}{n} = -\frac{1}{2} n^2 r_{i3} E, \quad (3)$$

其中 n 为折射率, r_{i3} 为晶体的有效系数, $i = 1, 2, 3$, 与记录读出结构和光束的偏振方向有关。当用寻常偏振光时,

$$n = n_o = 2.286, r_{i3} = r_{13} = 10 \times 10^{-12} \text{ m/V}^{[11]},$$

当用非常偏振光时,

$$n = n_e = 2.2, r_{i3} = r_{33} = 31 \times 10^{-12} \text{ m/V}.$$

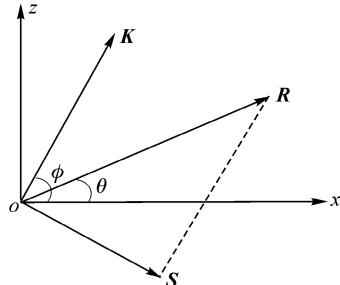


Fig. 1 R and S , the propagation vectors of the reference wave R and the signal wave S and their relation to the grating vector K . The Bragg angle θ and the slant angle ϕ are indicated

而光栅周期的变化 $\Delta\Lambda$ 和光栅倾角的变化 $\Delta\phi$ 都是由外加电场感应压电效应使晶格变形的结果。图 2 是外加电场情况下由于压电效应而引起的晶体

晶格变形的情况示意图。其中晶体的 C 轴、外加电场方向与 Z 轴方向平行, 实线表示无外加电场时晶体中光栅情况, 虚线表示加上外电场以后晶体光栅变形的情况。图中 K, K' , ϕ, ϕ' , Λ, Λ' 分别表示无外电场和有外电场时晶体的折射率相位栅矢量, 相位栅矢量与 x 轴的夹角和折射率相位栅周期。由于 LiNbO_3 晶体的压电效应是线性的, 沿不同方向的应变是均匀的, 很显然加上外电场后折射率相位栅仍然是平行的。晶体的压电效应可表示为^[14]

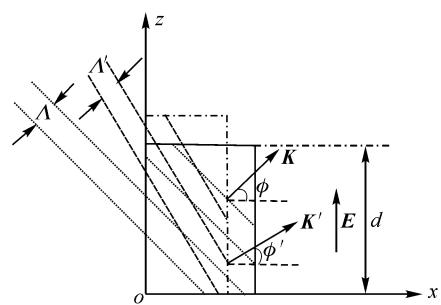


Fig. 2 Crystal lattice deformation caused by the piezoelectric effect. The broken lines represent the deformed crystal

$$\mathbf{S}_{jk} = \sum_i d_{ijk} E_i, \quad (4)$$

其中 $i, j, k = x, y, z$, \mathbf{S}_{jk} 是二阶应变张量, d_{ijk} 是三阶反压电张量系数。对 LiNbO_3 晶体, 由于外电场方向沿 C 轴方向, 可计算得

$$\mathbf{S}_{jk} = \begin{bmatrix} d_{31} E & 0 & 0 \\ 0 & d_{31} E & 0 \\ 0 & 0 & d_{31} E \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 d_{31}, d_{33} 是三阶反压电张量系数, $d_{31} = -0.85 \times 10^{-12} \text{ C/N}$, $d_{33} = 6.0 \times 10^{-12} \text{ C/N}^{[14]}$, $S_{11} = S_{22} = d_{31} E$, $S_{33} = d_{33} E$ 为正应变分量, 分别为沿 x, y, z 轴方向的应变张量, 负值表示缩短, 正值表示伸长。在图 2 经过简单得几何计算并代入应变张量 $S_{11} = S_{22} = d_{31} E$, $S_{33} = d_{33} E$ 后表达式为

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \arctan \left(\frac{1 + d_{31} E}{1 + d_{33} E} \tan \phi \right) - \\ &\cot(\phi - \theta) \left\{ -\frac{1}{2} n^2 r_{i3} E + \frac{\sin \left[\arctan \left(\frac{1 + d_{31} E}{1 + d_{33} E} \tan \phi \right) \right] (1 + d_{33} E)}{\sin \phi} - 1 \right\} - \phi. \end{aligned} \quad (6)$$

根据柯基尼克衍射效率公式^[12], 在弱耦合和布喇格条件偏离的情况下, 全息光栅的衍射效率近似

表示为

$$\eta = \gamma^2 \operatorname{sinc}^2 \xi, \quad (7)$$

其中

$$\gamma = \frac{\pi n_1 d}{\lambda (\cos \theta_1 \cos \theta_2)},$$

$$\xi = \Delta\theta \cdot k \cdot d \cdot \sin(\phi - \theta) / 2 \left(\cos \theta - \frac{k}{\beta} \cos \phi \right),$$

θ_1, θ_2 分别为记录光束与 x 轴的夹角, n_1 为光折变晶体由于记录光栅而引起的晶体折射率变化的大小, d 为两写入光束的作用长度, $k = 2\pi/\Lambda$ 为光栅的波数, $\Lambda = \lambda/2n\sin(\theta/2)$, $\beta = 2\pi n/\lambda_0$ 是平均传输常量。从(7)式可以看出如果用与记录光束方向一致的光束读出光栅, 由于外加电场引起的布拉格失配角 $\Delta\theta$ 的存在将引起光栅衍射效率的改变。

在用光折变全息的电场效应设计光开关时, 我们感兴趣的是衍射效率比, 即衍射效率的值在有无外加电场读出时之比:

$$\eta_{E,0} = \frac{\eta_{(E=E_0)}}{\eta_{(E=0)}} = \frac{\gamma_{E_0}^2 \cdot \text{sinc}^2 \zeta}{\gamma_0^2 \cdot \text{sinc}^2 0} = \frac{\gamma_{E_0}^2 \cdot \text{sinc}^2 \zeta}{\gamma_0^2}, \quad (8)$$

为使记录的全息具有开关功能, 必须使有无外电场时的衍射效率比的差异尽可能大。若读出光栅时无外加电场, 即 $E = 0$, 则 $\Delta\theta = 0$, 相应地 $\xi = 0$, $\eta_{E,0} = 1$; 而当读出光栅时有外加电场, 则 $\Delta\theta$ 和 ξ 不再为 0, 相应地 $\eta_{E,0} \neq 1$ 。根据(8)式, 当选择特定的外加电场 E_s 使 $\xi = \pi$, 则衍射效率比 $\eta_{E,0} = 0$ 。很显然通过控制外电场的有无可使衍射效率比为最大和最小值实现开关功能。使衍射效率比为零时特定的外加电场 E_s 值可由(6)式和表达式

$$\xi = \Delta\theta \cdot k \cdot d \cdot \sin(\phi - \theta) / 2 \left(\cos \theta - \frac{k}{\beta} \cos \phi \right) = \pi,$$

共同确定。

3 直通交换开关的实现

以上讨论的原理可用来实现如图 3 所示的开关

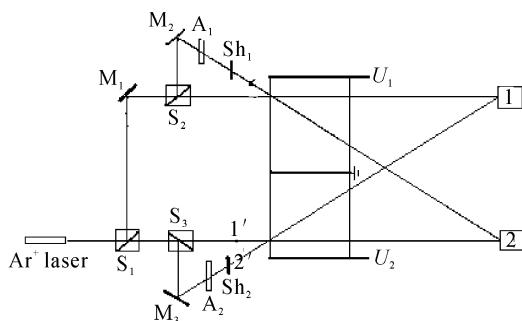


Fig. 3 2×2 bypass-exchange switch controlled by applied electric field

设置。其中 S_1, S_2, S_3 是光束分束器; M_1, M_2, M_3 是反射镜; A_1, A_2 是光束衰减器, 用来控制记录光束的光强比; Sh_1, Sh_2 是光栏, 读出时用来阻挡信号光通过; U_1, U_2 是外加电压大小。

首先通过光束衰减器 A_1, A_2 , 两对光束 $1, 2$ 和 $1', 2'$ 同时在各自的晶体内部记录全息。记录过程结束后, 再用原记录光束 $1, 1'$ 来读, 两束衍射光由光电探测器接收。结合前述的讨论探测器的输入有两种情况:

a) 当特定的外加电压 U_1, U_2 存在时, 使 $E_1 = E_2 = E_s$, 由于晶体的电光效应和压电效应导致偏离布拉格角存在, 此时两全息的衍射效率均为 0, 即衍射光为 $0, 1, 1'$ 全直通。光电探测器的输入分别为 1 和 $1'$ 的直通光, 实现开关的直通操作。

b) 当无外加电压 U_1, U_2 时, $E_1 = E_2 = 0$, 衍射效率不再为 0, 即在输出端产生读出光和衍射光。在这种情况下, 如果通过选择合适的记录光束比 $\beta = \exp(-\gamma l)$ ^[17] 使衍射效率为 100%, 则读出光束的能量完全转移到衍射光, 此时探测器的输入分别为 1 和 $1'$ 的衍射光, 方向为 2 和 $2'$, 实现开关的交换操作。

很显然, 通过控制外电场的有无, 图 3 实现了开关的直通交换操作。

4 理论计算

以长度为 10 mm (x), 宽度为 4 mm (z) 的 LiNbO₃ 晶体为例进行计算。设铁电晶体 C 轴和外加电场方向平行于坐标 Z 轴, 按照图 3 的几何关系有 $\phi = \pi/2 - \theta/2$, 由于无法给出 E 和 θ 之间的解析表达式, 所以我们给出它们之间的数值关系。图 4 和图 5 分别为用寻常偏振光和非常偏振光记录和读出时为使衍射效率为 0 时外加电场 E_s 和入射角 θ (晶体内部测量) 之间的关系曲线。

从图 4 和图 5 可以看出当采用寻常偏振光记录和读出光栅时, (3) 式中的电光系数取 $r_{ij} = r_{13} = 10 \times 10^{-12}$ m/V, 此时在不考虑和考虑压电效应的两种情况下满足衍射效率为 0 的 E_s 值相差很大, 说明在此情况下, 压电效应相对于电光效应很明显, 不可忽略。而在采用非常偏振光记录和读出光栅时, (3) 式中的电光系数取 $r = r_{33} = 31 \times 10^{-12}$ m/V, 此时在不考虑和考虑压电效应两种情况下 E_s 值相差较小, 说明此时相对于晶体的电光效应来讲压电效应的影响很小, 可忽略, 而且在入射角(晶体内部测量) 大

于 8° 时, E_s 的值都是 10^6 V/m数量级,比用寻常偏振光时普遍低了一个数量级,为实验制作提供了可能性和安全性。

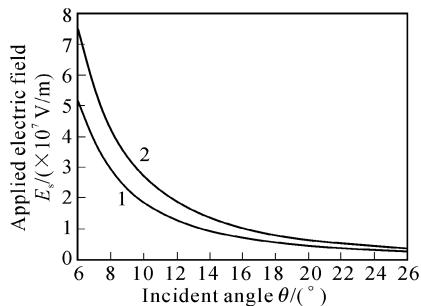


Fig. 4 The relation of E_s with respect to the incident angle (measured inside the crystal) when ordinary beam used for writing and reading the gratings. Relation 1 and relation 2 represent the conditions of without and with regarding the piezoelectric effect respectively

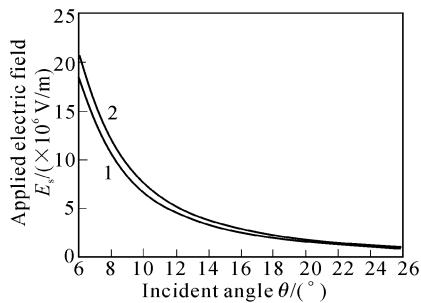


Fig. 5 The relation of E_s with respect to the incident angle (measured inside the crystal) when the extraordinary beam used for writing and reading the gratings. Relation 1 and relation 2 represent the conditions of without and with regarding the piezoelectric effect respectively

第3节开关设计曾指出无外场读出时为获得100%的衍射效率可通过选择合适的记录光束比实现。图6和图7分别为寻常偏振光和非常偏振光时

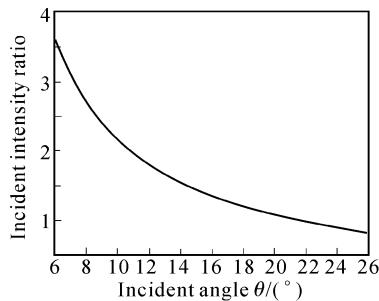


Fig. 6 The relation of the beams intensity ratio with respect to the incident angle (measured inside the crystal) when the diffraction efficiency of the grating written by the ordinary beam is 100%

记录光束比与入射角的关系曲线。通过两条曲线对特定的入射角可选择相应的记录光束比,实现无外加电场时100%的衍射效率。

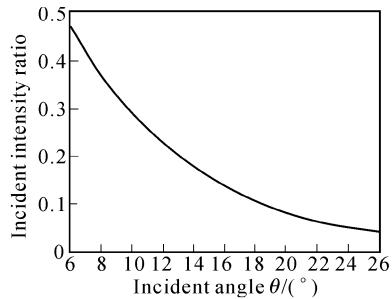


Fig. 7 The relation of the beams intensity ratio with respect to the incident angle (measured inside the crystal) when the diffraction efficiency of the grating written by the extraordinary beam is 100%

5 讨 论

本文讨论了在光折变LiNbO₃晶体中建立电场控制的 2×2 直通交换开关的原理设计方案。文中全面考虑了电场作用下的压电和电光效应,基于衍射效率公式和光栅的布拉格条件,给出了为获得最佳衍射效率比时外加电场及写入光束比与记录角度间的关系曲线。在光栅记录阶段,只有电光效应起作用,此时应使记录光束比为 $\beta=\exp(-\gamma l)$ 。在光栅的读出阶段,当实现开关的交换操作时,既无电光效应也无压电效应,发生的仅仅是光束的衍射,此时衍射的效率是100%;当实现开关的直通操作时,电光效应和压电效应都发生作用。如果用 $\Delta\theta_P$, $\Delta\theta_E$ 分别表示电光效应和压电效应引起入射角偏离布拉格角的大小,由(6)式可得

$$\Delta\theta_E = \frac{1}{2}n^3 r_{13} Ecot(\phi - \theta), \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta\theta_P = & \arctan\left(\frac{1+d_{31}E}{1+d_{33}E}\tan\phi\right) - \cot(\phi - \theta) \times \\ & \left\{ \frac{\sin\left[\arctan\left(\frac{1+d_{31}E}{1+d_{33}E}\tan\phi\right)\right](1+d_{33}E)}{\sin\phi} - 1 \right\} - \phi. \end{aligned} \quad (10)$$

通过计算表明,电光效应有助于入射光束偏离布拉格条件,是正作用;压电效应阻碍入射光束偏离布拉格条件,是负作用,从而使所需的外加电场的强度增大。图8和图9是光折变开关实现直通操作时,分别用寻常偏振光和非常偏振光记录和读出光栅时,电光效应和压电效应所引起的入射角偏离布拉格角的偏离。曲线e表示电光效应引起的偏离大

小,曲线 p 表示压电效应引起的偏离大小,曲线 t 表示电光效应和压电效应的综合作用。通过计算分析指出寻常偏振光记录和读出光栅时,压电效应相对于电光效应很明显,不可忽略。而在采用非常偏振

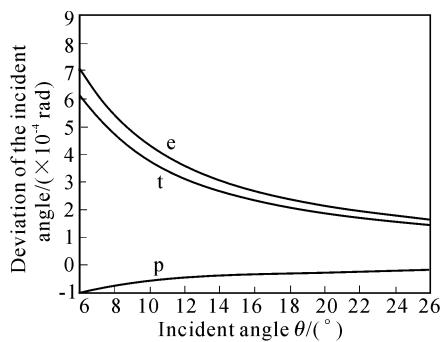


Fig. 8 The relation of the deviation with respect to the incident angle (measured inside the crystal) when the ordinary beam used for writing and reading the gratings. Relation e and p represent the deviation caused by the electric-optic and piezoelectric effect respectively, relation t represents the total deviation and equals e added by p

光记录和读出光栅时,相对于晶体的电光效应来讲压电效应的影响很小,可忽略,而且在入射角(晶体内测量)大于 8° 时, E_s 的值比用寻常偏振光时低了一个数量级,对开关的制作有利。

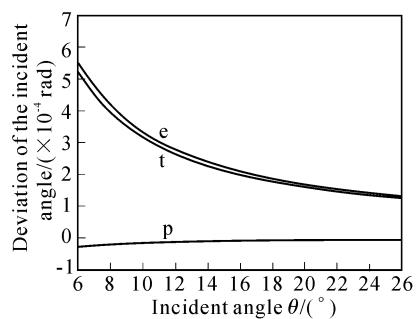


Fig. 9 The relation of the deviation with respect to the incident angle (measured inside the crystal) when the extraordinary beam used for writing and reading the gratings. Relation e and p represent the deviation caused by the electric-optic and piezoelectric effect respectively, relation t represents the total deviation and equals e added by p

参 考 文 献

- 1 Huang A. Architecture considerations involved in the design optical computer. *Proc. SPIE*, 1984, **72**:780~795
- 2 Tooley F, Wakelin S. Design of a symmetric self-electro-optic device cellular-logic image processor. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(11):1850~1862
- 3 Glass A M. Fundamental limit of the speed of photorefractive effect and its impact on device application and material research: comments. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(16):3189~3196
- 4 Albanes G, Kumar J, Teier W H. Investigation of the photorefractive behavior of Chrome-doped GaAs by using two-beam coupling k. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(10):650~652
- 5 Huignard J P, Marrakchi A. Coherent signal beam amplification in two-wave mixing experiments with photorefractive BSO crystals. *Opt. Commun.*, 1981, **38**(4):249~254
- 6 Honma S, Okamoto A, Takayama Y. Photorefractive duplex two-wave mixing and all-optical deflection switch. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 2001, **18**(7):974~981
- 7 Yan Xiaona, Liu Liren Liu. Photorefractive switch controlled by polarized effect. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(7):1003~1005 (in Chinese)
- 8 Yan Xiaona, Liu Liren. Theory of anisotropic-diffraction based photorefractive switch. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10):1249~1252 (in Chinese)
- 9 Kenan R P, Verber C M, Wood Van E. Wide-angle electro-optic switch. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **24**(9):428~429
- 10 Boyland A J, Mailis S, Hendricks J M et al.. Electro-optically controlled beam switching via total internal reflection at a domain-engineered interface in LiNbO₃. *Opt. Commun.*, 2001, **197**(1~3):193~200
- 11 Benny Pesach, Guy Bartal, Eli Refaeli et al.. Free-space optical cross-connect switch by use of electroholography. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(5):746~758
- 12 Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings. *Bell Syst. Technol.*, 1969, **48**(9):2909~2930
- 13 Gallo J T, Verber C M. Model for the effects of material shrinkage on volume holograms. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(29):6797~6804
- 14 Muller R, Alvarez-Bravo J V, Arizmendi L et al.. Tuning of photorefractive interference filters in LiNbO₃. *J. Phys. (D): Appl. Phys.*, 1994, **27**(8):1628~1632
- 15 Weis R S, Gaylord T K. Lithium niobate: summary of physical properties and crystal structure. *Appl. Phys. (A)*, 1985, **37**(4):191~203
- 16 Liu Simin. *Nonlinear Photorefractive Optics* (非线性光折变光学). Beijing: Standard Press of China, 1992. 1~91 (in Chinese)
- 17 Cai L Z, Yeh P, Liu H K. Mean fringe contrast, optimum beam ratio and maximum diffraction efficiency for volume gratings written by coupled waves. *Opt. Commun.*, 1996, **132**(1,2):48~54

Theory of Electric Field-Controlled 2×2 Photorefractive Switch

Dong Liangwei Yan Xiaona Shi Kaiyuan Yan Jinkui

(Information Optics Laboratory, Physics Department of Science School,

Shanghai University, Shanghai 200436)

(Received)

Abstract: The principle of designing an electric field-controlled 2×2 bypass exchange switch in the photorefractive LiNbO_3 crystal is discussed. By controlling the magnitude of the applied electric field, the readout beam can satisfy or deviate the Bragg condition, which makes the diffraction efficiency be 1 or 0, and thus realize the exchange or bypass operation of the switch. Fully regarded the piezoelectric effect, the electrooptic effect caused by the applied electric field and based on the equation of diffraction efficiency and Bragg condition, the relations between the applied electric field, the writing beam ratio with respect to the writing angles are analyzed.

Key words: nonlinear optics; optical switch; theoretical analysis; refractive crystals; electrooptical effect; piezoelectric effect